

УДК 621.771.25:621.778.1.-422.04

А. И. ЛЕЩЕНКО, В. А. ТОКМАКОВ, К. Ю. КЛЮЧНИКОВ**МЕТОДЫ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЯ ВОЛОЧЕНИЯ В РОЛИКОВЫХ ВОЛОКАХ**

Выполнен обзор известных методов по определению напряжения волочения в двухвалковых роликовых волокнах и оценка их точности путем сравнения расчетных значений с экспериментальными данными. Рассмотрены методы, основанные на решении уравнения равновесия сил в очаге деформации и методы, основанные на решении уравнения энергетического баланса в очаге деформации. Сравнение расчетных и экспериментальных значений напряжения волочения показало, что при прокатке-волочении медных образцов погрешность расчета может достигать 40-45% при использовании выражений, полученных из условия равновесия сил в очаге деформации и 45-50% при использовании выражений, основанных на решении уравнения энергетического баланса. При прокатке-волочении стальных образцов максимальная погрешность расчета достигает 40% при использовании выражений, полученных из условия равновесия сил в очаге деформации и 45% при использовании выражений, основанных на решении уравнения энергетического баланса. Установлено, что выражения для определения напряжения волочения в двухвалковых роликовых волокнах, полученные из условия равновесия сил в очаге деформации не учитывают ряд факторов, характеризующих процесс прокатки-волочения в роликовой волоке, и поэтому могут использоваться для приближенной оценки кинематических и энергосиловых параметров деформации. На основании сравнения расчетных и экспериментальных значений величины напряжения волочения сделан вывод о необходимости разработки математической модели процесса деформации в роликовых волокнах на основе энергетической теории прокатки.

Ключевые слова: роликовые волокна, напряжение волочения, метод расчета

О. І. ЛЕЩЕНКО, В. А. ТОКМАКОВ, К. Ю. КЛЮЧНИКОВ**МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ НАПРУГИ ВОЛОЧІННЯ У РОЛІКОВИХ ВОЛОКАХ**

Виконано огляд відомих методів по визначенню напруги волочіння у двовалкових роликових волокнах і оцінка їх точності шляхом порівняння розрахункових значень з експериментальними даними. Розглянуто методи, засновані на рішенні рівняння рівноваги сил в осередку деформації і методи, засновані на рішенні рівняння енергетичного балансу в осередку деформації. Порівняння розрахункових і експериментальних значень напруги волочіння показало, що при прокатці-волочінні мідних зразків похибка розрахунку може досягати 40-45% при використанні виразів, отриманих з умови рівноваги сил в осередку деформації і 45-50% при використанні виразів, заснованих на вирішенні рівняння енергетичного балансу. При прокатці-волочінні сталевих зразків максимальна похибка розрахунку досягає 40% при використанні виразів, отриманих з умови рівноваги сил в осередку деформації і 45% при використанні виразів, заснованих на вирішенні рівняння енергетичного балансу. Встановлено, що вирази для визначення напруги волочіння у двовалкових роликових волокнах, отримані з умови рівноваги сил в осередку деформації, не враховують ряд факторів, які характеризують процес прокатки-волочіння у роликових волокнах, і тому можуть використовуватися для наближеної оцінки кінематичних і енергосилових параметрів деформації. На підставі порівняння розрахункових і експериментальних значень величини напруги волочіння зроблено висновок про необхідність розробки математичної моделі процесу деформації у роликових волокнах на основі енергетичної теорії прокатки.

Ключові слова: роликові волокна, напруга волочіння, метод розрахунку

A. I. LESHCHENKO, V. A. TOKMAKOV, K. Y. KLUCHNIKOV**METHODS OF CALCULATION OF TENSION OF ROLLER DIE DRAWING**

The review of the known methods on determination of tension of drawing in double roller die plates and assessment of their precision is executed by comparing estimated values with experimental data. Methods, based on the resolution of equation of balance of powers in a hearth deformations and methods, based on the resolution of equation of energy balance in the hearth of deformation, are considered. Comparison of estimated and experimental values of tension of drawing showed that at rolling-drawing of copper samples the error of calculation can reach 40-45% when using expressions, derived from the equation of balance of powers in a hearth deformations and 45-50% when using expressions, derived from equation of energy balance in the hearth of deformation. At rolling-drawing of steel samples the maximal error of calculation reaches 40% when using expressions, derived from the equation of balance of powers in a hearth deformations and 45% when using expressions, derived from equation of energy balance in the hearth of deformation. It is concluded that expression for determination of tension of drawing in double roller die plates, derived from the equation of balance of powers in hearth deformations does not take into account a number of factors, characterizing the process of rolling-drawing in roller die plates, and therefore can be used for the approximate estimation of kinematic and power parameters of deformation. Based on comparison of estimated and experimental values of tension of drawing, the necessity of development of mathematical model of process of deformation for roller die plates on the basis of power theory of rolling was shown.

Key words: roller dies, tension drawing, calculation method

Постановка задачі. Процес прокатки-волочення широко применяется при обработке металлов давлением. Разработаны процессы и технологическое оборудование для производства простых и сложных профилей из черных и цветных металлов и сплавов, получает все большее распространение производство холоднодеформированной арматуры на специализированных линиях [1]. Исследуются вопросы прокатки-волочения профилей из материалов, обладающих особыми свойствами [2].

Напряжение волочения влияет на удельное давление и силу прокатки и, соответственно, на геометрические размеры деформирующего инструмента (валков), определяет мощность тягового

механизма, влияет на стабильность протекания технологического процесса прокатки-волочения (обрывность при волочении). Однако отмечено, что «...до сих пор не существует совершенной теории волочения, которую можно было использовать для предсказания усилия волочения, возникающего при данном способе с приемлемой степенью точности» [1, с. 130].

Кроме того, в известных теоретических решениях по определению напряжения волочения в роликовых волокнах отсутствует сравнение рассчитанных значений напряжения волочения по предлагаемым моделям с экспериментальными значениями, что

затрудняет оценку адекватности предлагаемых моделей.

Таким образом, вопрос о выборе метода расчета напряжения волочения в роликовых волоках, обеспечивающего наиболее точное определение этого параметра, является актуальным.

Целью работы является обзор известных методов по определению напряжения волочения в роликовых волоках и оценка их точности путем сравнения расчетных значений с экспериментальными данными.

Поскольку при прокатке-волочении широко применяются двухвалковые роликовые волоки, в рамках настоящей работы выполнена оценка применения известных методов расчета напряжения волочения в двухвалковых роликовых волоках (РВ).

Методы, основанные на решении уравнения равновесия сил в очаге деформации

В работе [3] исходя из решения уравнения А. И. Целикова для определения среднего удельного давления при прокатке с натяжением, получено выражение для определения напряжения волочения при прокатке-волочении

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = 1,15(1 - \xi_1), \quad (1)$$

где ξ_1 – коэффициент переднего натяжения,

$$\xi_1 = \frac{a\varphi(\delta-1)\frac{\Delta h}{h_1} - \frac{\delta-1}{2(\delta+1)}\left(\frac{h_K}{h_1}\right)^{\delta+1} \cdot \frac{1}{\delta+1} + \frac{h_K}{h_1}}{a\varphi(\delta-1)\frac{\Delta h}{h_1} - \frac{\delta-1}{2(\delta+1)}\left(\frac{h_K}{h_1}\right)^{\delta+1} \cdot \frac{1}{\delta+1}},$$

a – безразмерный коэффициент,

$$a = \frac{1}{2(1+S)\ln\frac{h_0}{h_1}};$$

φ – коэффициент упрочнения,

$$\varphi = \frac{\sigma_{\text{вых}}}{0,5(\sigma_{\text{вх}} + \sigma_{\text{вых}})};$$

δ – показатель деформации,

$$\delta = \frac{2f}{\alpha_0};$$

$\frac{h_K}{h_1}$ – отношение высоты полосы в критическом сечении к высоте полосы на выходе из очага деформации,

$$\frac{h_K}{h_1} = \sqrt{\frac{h_0}{h_1}};$$

S – опережение,

$$S = \frac{h_1}{\Delta h} \left(\frac{h_K}{h_1} - 1 \right)^2.$$

В выражении (1) и его составляющих приняты следующие обозначения:

σ_1 – напряжение волочения, необходимое для деформации металла в РВ (величина σ_1 будет упоминаться далее по тексту без ее расшифровки);

σ_s – среднее напряжение текучести деформируемого металла (величина σ_s будет упоминаться далее по тексту без ее расшифровки);

$\sigma_{\text{вых}}$ – напряжение текучести деформируемого металла на выходе из очага деформации;

$\sigma_{\text{вх}}$ – напряжение текучести деформируемого металла на входе в очаг деформации;

h_0 – высота раската перед РВ;

h_1 – высота раската после РВ;

Δh – абсолютное обжатие раската в РВ;

h_K – высота полосы в критическом сечении;

f – коэффициент трения на поверхности касания в очаге деформации в РВ;

α_0 – угол касания металла с валками в очаге деформации в РВ.

В работе [4] И. Л. Перлиным для определения напряжения волочения при волочении в роликовой волоке получено выражение

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = 1,15\gamma_c \frac{A+1}{A} \left[1 - \left(\frac{h_1}{h_0} \right)^A \right], \quad (2)$$

где γ_c – коэффициент, учитывающий траектории продольных главных напряжений у выхода из деформационной зоны,

$$\gamma_c = \frac{\alpha + \rho}{\sin(\alpha + \rho)};$$

α – приведенный угол, равный половине угла касания α_0 ($\alpha = 0,5\alpha_0$);

ρ – угол трения,

$$\rho = \text{artg} \left[\frac{1}{4\sqrt{\pi}} \left(\frac{\Pi_0}{\sqrt{F_0}} + \frac{\Pi_1}{\sqrt{F_1}} \right) \cdot f \cdot \frac{\lambda-1}{2(\lambda+1)} \right];$$

A – безразмерный коэффициент,

$$A = \cos^2 \rho \cdot \left(1 + f \cdot \frac{\lambda-1}{2(\lambda+1)} \cdot \text{ctg} \alpha \right) - 1.$$

В выражении (2) и его составляющих приняты следующие обозначения:

λ – коэффициент вытяжки;

Π_0, Π_1 – периметр раската до и после деформации соответственно;

F_0, F_1 – площадь раската до и после деформации соответственно.

В работе [5] Ю. И. Коковихина на основании совместного решения дифференциального уравнения равновесия, условия пластичности для осесимметричной деформации и при условии трения на контакте по закону Зибеля, получено следующее выражение для определения напряжения волочения при волочении в роликовой волоке

$$\sigma_1 = \sigma_{\text{вых}} - \sigma_{\text{вх}} c [2\lambda_n - (\lambda + 1)] - (m - \sigma_{\text{вх}})(\lambda - 1). \quad (3)$$

В выражении (3) приняты следующие обозначения:

c – коэффициент, определяющий замену криволинейной поверхности контакта хордой,

$$c = f \cdot \text{artg} \alpha_0;$$

λ_n – величина вытяжки в нейтральном сечении,

$$\lambda_H = \sqrt{\lambda};$$

m – модуль упругости деформируемого материала,

$$m = (\sigma_{\text{вых}} - \sigma_{\text{вх}}) / (\lambda - 1).$$

В работе [6] приведено следующее выражение для определения напряжения волочения в роликовой волоке

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = 1 - \left(\frac{h_1}{h_0}\right)^{\frac{4}{\pi}} \times e^{\Delta}, \quad (4)$$

где коэффициент Δ рассчитывается по выражению

$$\Delta = \frac{4f}{\pi} \left[\frac{E}{\sqrt{E^2 - 1}} \times \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{E^2 - 1} \times \sin \alpha_0}{E \times \cos \alpha_0 - 1} \right) \right] - \frac{2E}{\sqrt{E^2 - 1}} \times \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{E^2 - 1} \times \sin \frac{\alpha_0}{2}}{E \times \cos \frac{\alpha_0}{2} - 1} \right).$$

Обозначения, принятые в выражении (4):

E – коэффициент, определяемый из выражения

$$E = 1 + 0,5h_1/R;$$

R – радиус неприводного вала РВ.

В работе [7] В. А. Николаева приведено выражение для определения напряжения волочения, полученное из условия равновесия горизонтальных составляющих сил, действующих в очаге деформации, в виде

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = \frac{f_\sigma \Delta h}{f h_1} \left[1 + \frac{2f}{\alpha_0} \left(\frac{2\gamma}{\alpha_0} - 1 \right) \right]. \quad (5)$$

Отношение нейтрального угла к углу касания γ/α_0 предлагается принимать в диапазоне $0,55 \div 0,60$, а отношение показателя сил трения f_σ к коэффициенту трения на поверхности касания f – в диапазоне $0,86 \div 0,91$, согласно исследованиям автора работы [7]. Однако в указанной работе нет рекомендаций по выбору величин отношений γ/α_0 и f_σ/f для конкретных условий прокатки-волочения, а также не указан способ определения напряжения текучести деформируемого металла в очаге деформации РВ. В связи с этим, разбег значений при определении величины напряжения волочения по выражению (5) может достигать $20 \div 25\%$ только за счет применения нижней или верхней границ отношений γ/α_0 и f_σ/f .

В работе [1] приведено выражение для определения напряжения волочения в РВ, представленное нами в относительных напряжениях

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = 1,15 \left[1 - \left(\frac{h_1}{h_0}\right)^{\frac{4}{\pi}} \times \exp[f\beta(\alpha - 2\alpha')] \right] \quad (6)$$

где $\beta = \frac{8}{\pi \sqrt{h_1/R}}$; $\alpha = \text{artg} \frac{\alpha_0}{\sqrt{h_1/R}}$; $\alpha' = \text{artg} \frac{\alpha_0}{2\sqrt{h_1/R}}$.

Анализ выражений (1–6) показывает, что выражения для определения напряжения волочения раската в роликовой волоке, полученные из решения уравнения равновесия сил в очаге деформации, обобщенно можно представить в виде

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = A \cdot (1 - B),$$

где A – коэффициент, учитывающий неравномерность деформации;

B – коэффициент, учитывающий влияние геометрических параметров очага деформации и коэффициента трения на контакте полоса-валок на напряжение волочения.

С использованием выражений (1–6) были выполнены расчеты величины напряжения волочения, необходимого для осуществления процесса деформации в РВ. Режимы деформации при расчете и экспериментальные значения напряжения волочения приняты по экспериментальным данным прокатки-волочения медных (медь марки М1) и стальных (сталь марки 08) полос, представленным в работе [3]. Значения напряжения текучести металла определялись по кривым упругости, полученным авторами работы [3] экспериментально для использованных в опытах образцов. Значения коэффициента трения на контактных поверхностях очага деформации при установившемся процессе деформации в РВ приняты по данным работы [8] и составляют $f = 0,18$ для медных и $f = 0,2$ для стальных образцов.

На рис. 1 и 2 приведены значения погрешности расчета величины напряжения волочения по указанным выражениям при прокатке-волочении медных и стальных образцов.



Рис. 1 – Погрешность расчета величины напряжения волочения при прокатке-волочении медных образцов при изменении логарифмического показателя высотной деформации:

1 – по выражению (1); 2 – (2); 3 – (3); 4 – (4); 5 – (5); 6 – (6)

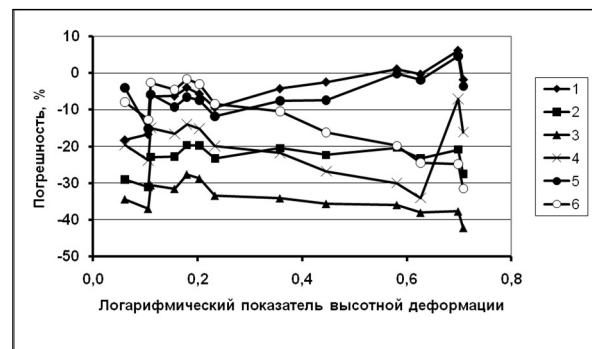


Рис. 2 – Погрешность расчета величины напряжения волочения при прокатке-волочении стальных образцов при изменении логарифмического показателя высотной деформации:

1 – по выражению (1); 2 – (2); 3 – (3); 4 – (4); 5 – (5); 6 – (6)

Основываясь на результатах расчетов по определению величины напряжения волочения при прокатке-волочении для различных металлических материалов, можно установить, что наименьшая погрешность расчета величины напряжения волочения достигается при использовании выражений (1) и (6) – 17...+15%. При использовании выражения (3) погрешность расчета величины тягового напряжения максимальна.

Методы, основанные на решении уравнения энергетического баланса в очаге деформации

В работе [9] Ш. Гелеи предложено выражение для определения напряжения волочения в РВ, представленное нами в относительных напряжениях и в современной записи

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = \frac{n_\sigma}{F_1} \left[l_d b_{cp} f \left(1 - \frac{h_1}{h_0} \frac{1}{\cos \alpha_0} \right) + \right] + 0,58 \frac{l_d}{D}, \quad (7)$$

где n_σ – коэффициент, учитывающий влияние напряженного состояния, определяется из выражения

$$n_\sigma = \frac{1 - 0,29 \frac{\alpha_0}{2}}{1 + \frac{\Delta h b_{cp} + l_d b_{cp} f \left(1 - \frac{h_1}{h_0} \frac{1}{\cos \alpha_0} \right)}{2F_1}};$$

b_{cp} – средняя ширина раската в очаге деформации;

l_d – длина очага деформации;

d – диаметр шейки валка РВ;

D – диаметр валка РВ;

$f_{ш}$ – коэффициент трения в опорах валков РВ.

В выражении (7) автор работы [9] учитывает работу деформации, работу, затраченную на преодоление сил трения на контакте полоса-валок, работу, затраченную на преодоление сил трения в опорах валков, и работу, затраченную на преодоление внутренних сдвигов.

В работе [10] рассмотрен процесс волочения полосы через волоку с неприводными валками в условиях плоской деформации. Для анализа этого процесса использована гипотеза плоских сечений, дуга захвата заменена хордой. При составлении уравнения энергетического баланса учитывалась мощность внутренних сил, мощность среза на поверхности входа в очаг деформации, мощность сил трения на контактной поверхности и мощность на преодоление сил трения в опорах неприводных валков.

Итоговые выражения, полученные в работе [10], можно записать в следующем виде:

при использовании условия постоянства сил трения по длине очага деформации $\tau = \psi \tau_s$

$$\frac{\sigma_1}{1,15\sigma_s} = \ln \frac{1}{\eta} + \frac{\alpha_0}{4} + \frac{\psi}{\alpha_0} \ln \frac{\left[1 + m \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) \right]^2}{\frac{1}{\eta}}; \quad (8)$$

при использовании закона трения в виде $\tau = f p_{cp}$

$$\frac{\sigma_1}{1,15\sigma_s} = \left(\ln \frac{1}{\eta} + \frac{\alpha_0}{4} \right) \left(1 + \frac{2f}{\alpha_0} (2m - 1) \right). \quad (9)$$

Обозначения, принятые в выражениях (8)–(9):

$\frac{1}{\eta}$ – коэффициент обжатия;

ψ – функция, зависящая от соотношения размеров очага деформации и состояния трущихся поверхностей [10];

m – параметр, характеризующий положение нейтрального сечения. Для выражения (8) m определяется как

$$m = 0,5 + \frac{f_{ш}}{\psi} \frac{p_c}{1,15\sigma_s} \frac{R_{ш}}{R},$$

а для выражения (9) как

$$m = 0,5 \left(1 + \frac{f_{ш}}{f} \frac{R_{ш}}{R} \right),$$

где $R_{ш}$ – радиус шейки валка РВ.

В работе [11] отмечено, что величина ψ является сложной функцией ряда механических и физико-химических факторов и ее определение возможно лишь экспериментальным путем. По этой причине в настоящем обзоре будет рассмотрено только выражение (9).

В работе [12] В. Г. Шеркунова и А. А. Штера выражение для определения напряжения волочения имеет следующий вид:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = n \ln \lambda + 2mf \left(\frac{2F_2 - F_n}{S_c} \right), \quad (10)$$

где n – коэффициент, учитывающий неравномерность деформации [13];

m – коэффициент, учитывающий количество роликов в калибре ($m=1$ для двухвалковых калибров);

F_2 – площадь зоны опережения в очаге деформации;

F_n – полная площадь контакта в очаге деформации;

S_c – средняя площадь поперечного сечения раската в очаге деформации.

В работе [14] приведена следующая зависимость для определения напряжения волочения при прокатке-волочении ненаклепанного металла:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = 1,15 \left[\ln \lambda \left(1 + 0,72 a_1 \sqrt{\ln \lambda} \right) + 0,3 \sqrt{\frac{\Delta h}{R} \left(1 + B^2 \frac{b_0^2}{h_0^2} \right)} + 0,5 f \left(\frac{\Delta h}{h_{cp}} \right) \sqrt{\frac{R}{\Delta h}} \right], \quad (11)$$

где a_1 – коэффициент, учитывающий прочностную характеристику деформируемой стали [14];

B – зависимость для расчета показателя поперечной деформации при прокатке-волочении полосы на гладких роликах:

$$B = 0,1 \left(\frac{R}{h_0} \right)^{0,32} \left(\frac{h_0}{b_0} \right)^{0,9} \varepsilon^{-0,22}.$$

При выводе зависимости (11) авторы работы [14] учитывали затраты энергии на работу формообразования, на преодоление сил контактного трения и трения в подшипниках роликовой волоки.

К недостаткам представленного в работе [14] метода следует отнести ограниченное количество марок сталей, для которых определены коэффициенты, учитывающие прочностную характеристику деформируемой стали.

В работе [15] напряжение волочения при волочении в двухроlikовой волоке предложено определять по формуле

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_s} = \left(0,8 + \frac{\Delta'}{4,4}\right) \ln\left(\frac{1}{1-r}\right), \quad (12)$$

где Δ' – геометрический параметр зоны деформации,

$$\Delta' = \sqrt{\frac{h_0}{4Rr}} (2-r),$$

$$r = 1 - (F_1/F_0).$$

По структуре выражения (12) можно определить, что оно не учитывает потери на преодоление трения на контакте полоса-валок и на преодоления трения в опорах валков роlikовой волоки.

С использованием выражений (7), (9) – (12), полученных исходя из решения уравнения энергетического баланса в очаге деформации, выполнены расчеты величины напряжения волочения, необходимого для осуществления процесса деформации в РВ. Режимы деформации, экспериментальные значения напряжения волочения, значения напряжения текучести металла приняты на основании данных, представленных в работе [3]. Значения коэффициента трения при установившемся процессе деформации в РВ приняты на основании работы [8] и составляют: $f = 0,18$ для медных и $f = 0,2$ для стальных образцов.

На рис. 3 и 4 приведены значения погрешности расчета величины напряжения волочения при прокатке-волочении медных и стальных образцов. Расчет напряжения волочения образцов из меди марки М1 по выражению (11) не выполняли, так как в работе [14] не приведены коэффициенты, учитывающие прочностную характеристику данного материала.

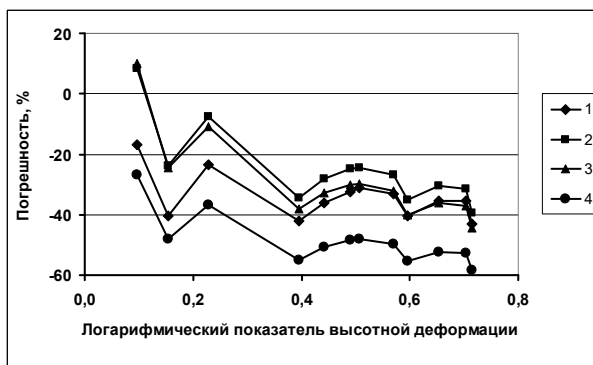


Рис. 3. Погрешность расчета величины напряжения волочения при прокатке-волочении медных образцов при изменении логарифмического показателя высотной деформации:

1 – по выражению (7); 2 – (9); 3 – (10); 4 – (12)

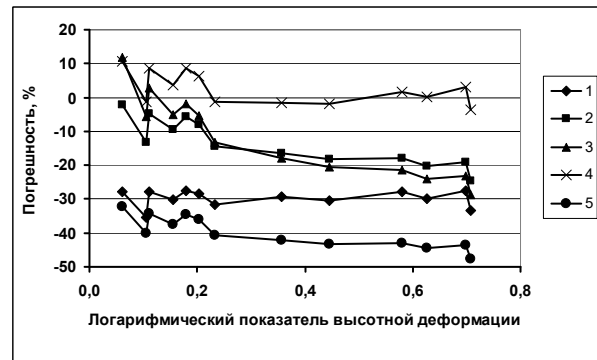


Рис. 4 – Погрешность расчета величины напряжения волочения при прокатке-волочении стальных образцов при изменении логарифмического показателя высотной деформации:

1–по выражению (7); 2–(9); 3–(10); 4–(11); 5–(12)

Основываясь на результатах расчетов по определению величины напряжения волочения при прокатке-волочении с применением методов, основанных на решении уравнения энергетического баланса в очаге деформации, можно установить следующее:

- наименьшая погрешность расчета величины напряжения волочения при прокатке-волочении стальных образцов достигается при использовании выражения (11) – $-7...+11\%$. При прокатке-волочении медных образцов наименьшая погрешность расчета достигается при использовании выражения (9) – $-39...+8\%$. При использовании выражения (12) погрешность расчета величины напряжения волочения максимальна в обоих случаях;

- выражение (11) невозможно использовать для определения величины напряжения волочения при деформации материалов, для которых в работе [14] не приведены коэффициенты, учитывающие прочностную характеристику деформируемого материала.

Выводы. На основании выполненного обзора выражений для расчета напряжения волочения, требуемого для деформации раската в двухроlikовой волоке, можно сделать следующие выводы.

1. Выражения, полученные из условия равновесия сил в очаге деформации проще, чем выражения, полученные из решения уравнения энергетического баланса, однако они не учитывают ряд факторов, характеризующих процесс прокатки-волочения в роlikовой волоке, и поэтому могут использоваться для приближенной оценки кинематических и энергосиловых параметров деформации.

2. Выражения, полученные из решения уравнения энергетического баланса, учитывают, что энергия, подаваемая в очаг деформации роlikовой волоки, расходуется на деформацию раската, на преодоление трения скольжения на контактной поверхности раската-валок и на преодоление сопротивления, создаваемого опорами роlikовой волоки.

3. Результаты сравнения расчетных и экспериментальных значений величины напряжения волочения в процессе прокатки-волочения указывают

на необходимость разработки математической модели процесса деформации в роликовых волокнах на основе энергетической теории взаимодействия прокатываемой полосы и валков.

Список литературы

1. Битков В. В. Технология и машины для производства проволоки. Екатеринбург: УрО РАН, 2004. ISBN 5-7691-1404-5.
2. The application of drawing technology with roller-die in the Nb-Zr wire production / Wu Menghai, Zhao Hongzhang, Li Jixian, Fan Huiru // Ningxia Engineering Technology, 2008. – No 4.
3. Тарновский И. Я., Шилов В. И. Прокатка-волочение в неприводных валках / Расчет и конструирование заводского оборудования. Сб. статей. Вып. 64. Машгиз, 1958. – С. 111–127.
4. Перлин И. Л., Ерманок М. З. Теория волочения. Москва: Металлургия, 1971. – 448 с.
5. Коковіхін Ю. І. Технологія сталедротного виробництва: Підручник. Київ. 1995. – 608 с. Рос. мовою.
6. Зинутти А., Саро Д. Преимущества роликовых волок при волочении проволоки / Специализированный журнал «Метизы». – Ассоциация «РосМетиз», 2009. – №1 (20) – С. 37–41.
7. Николаев В. А. Напряжение при волочении полос в неприводных валках / В. А. Николаев // Металл и лите Украины. – 2009. – №4-5. – С. 70–72.
8. Грудев А. П. Внешнее трение при прокатке / А. П. Грудев – М.: Металлургия, 1973. – 288 с.
9. Гелеи Ш. Расчет усилий и энергии при пластической деформации металлов / Ш. Гелеи. – М: Металлургиздат, 1958. – 420 с.
10. Степаненко В. И. Силовые условия при волочении через роликовую волоку / В. И. Степаненко, А. Г. Стукач, Л. М. Железняк // Известия ВУЗов. Черная металлургия. – 1973. – № 8. – С. 97–103.
11. Тарновский И. Я. Контактные напряжения при пластической деформации / И. Я. Тарновский, А. Н. Леванов, М. И. Поксеваткин – М.: Металлургия, 1966. – 280 с.
12. Шеркунов В. Г. Усилие волочения в роликовых волокнах / В. Г. Шеркунов, А. А. Штер // Теория и технология прокатки: сборник научных трудов №209. – Челябинск, 1978. – С. 97-100.
13. Выдрин В. Н. Процесс непрерывной прокатки / Выдрин В. Н., Федосиенко А. С., Крайнов В. И. – М.: Металлургия, 1970. – 456 с.
14. Гулько В. И. Производство профилей и проволоки в роликовых волокнах / В. И. Гулько, В. А. Войцеховский, А. К. Григорьев. – Ижевск: Удмуртия, 1989. – 132 с.

15. Wright, Roger N. Wire technology: process engineering and metallurgy / Roger N. Wright. Copyright © 2011, Elsevier Inc. p. 320.

References (transliterated)

1. Bitkov V. V. Tehnologija i mashiny dlja proizvodstva provoloki. Ekaterinburg: UrO RAN, 2004. ISBN 5-7691-1404-5.
2. The application of drawing technology with roller-die in the Nb-Zr wire production / Wu Menghai, Zhao Hongzhang, Li Jixian, Fan Huiru // Ningxia Engineering Technology, 2008. – No 4.
3. Tarnovskiy I. Ya., Shilov V. I. Prokatka-vlochenie v neprivodnykh valkakh / Raschet i konstruirovaniye zavodskogo oborudovaniya. Sb. statey. Vyp. 64. Mashgiz, 1958. – P. 111–127.
4. Perlin I. L., Ermanok M. Z. Teoriya vlocheniya. Moscow: Metallurgiya, 1971. – 448 p.
5. Kokovikhin Yu. I. Tekhnologiya staledrotovogo virobnitstva: Pidruchnik. Kiiv. 1995. – 608 p. Ros. movoyu.
6. Zinutti A., Saro D. Preimushchestva rolikovykh volok pri volochenii provoloki / Spetsializirovanny zhurnal «Metizy». – Assotsiatsiya «RosMetiz», 2009. – No1 (20) – P. 37-41.
7. Nikolaev V. A. Napryazhenie pri volochenii polos v neprivodnykh valkakh / V. A. Nikolaev // Metall i lit'e Ukrainy. – 2009. – No4-5. – P. 70-72.
8. Grudev A. P. Vneshnee trenie pri prokatke / A. P. Grudev – Moscow: Metallurgiya, 1973. – 288 p.
9. Gelei Sh. Raschet usiliy i energii pri plasticheskoy deformatsii metallov / Sh. Gelei. – Moscow: Metallurgizdat, 1958. – 420 p.
10. Stepanenko V. I. Silovye usloviya pri volochenii cherez rolikovuyu voloku / V. I. Stepanenko, A. G. Stukach, L M. Zheleznyak // Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya. – 1973. – No 8. – P. 97–103.
11. Tarnovskiy I. Ya. Kontaktnye napryazheniya pri plasticheskoy deformatsii / I. Ya. Tarnovskiy, A. N. Levanov, M. I. Poksevatkin – M.: Metallurgiya, 1966. – 280 p.
12. Sherkunov V. G. Usilie vlocheniya v rolikovykh volokakh / V. G. Sherkunov, A. A. Shter // Teoriya i tekhnologiya prokatki: sbornik nauchnykh trudov No209. – Chelyabinsk, 1978. – P. 97-100.
13. Vydrin V. N. Protseess nepreryvnoy prokatki / Vydrin V. N., Fedosienko A. S., Kraynov V. I. – M.: Metallurgiya, 1970. – 456 s.
14. Gul'ko V. I. Proizvodstvo profiley i provoloki v rolikovykh volokakh / V. I. Gul'ko, V. A. Voytsekhovskiy, A. K. Grigor'ev. – Izhevsk: Udmurtiya, 1989. – 132 p.
15. Wright, Roger N. Wire technology: process engineering and metallurgy / Roger N. Wright. Copyright © 2011, Elsevier Inc. p. 320.

Поступила (received) 10/06/2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Лещенко Олександр Іванович (Лещенко Александр Иванович, Leshchenko Alexandr Ivanovich) – Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України, відділ процесів і машин обробки металів тиском (ВОМТ), молодший науковий співробітник; м. Дніпро; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1877-8358>; e-mail: leschenko.a.73@gmail.com

Токмаков Вадим Анатолійович (Токмаков Вадим Анатольевич, Tokmakov Vadim Anatolievich) – Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України, відділ процесів і машин обробки металів тиском (ВОМТ), молодший науковий співробітник; м. Дніпро; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2599-7033>; e-mail: vtokmakov@technocenter.com.ua

Ключніков Кирило Юрійович (Ключников Кирилл Юрьевич, Kluchnikov Kirill Yuriyovich) – Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова Національної академії наук України, відділ процесів і машин обробки металів тиском (ВОМТ), молодший науковий співробітник; м. Дніпро; Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2465-3244>; e-mail: kirill.shaman.k@gmail.com